

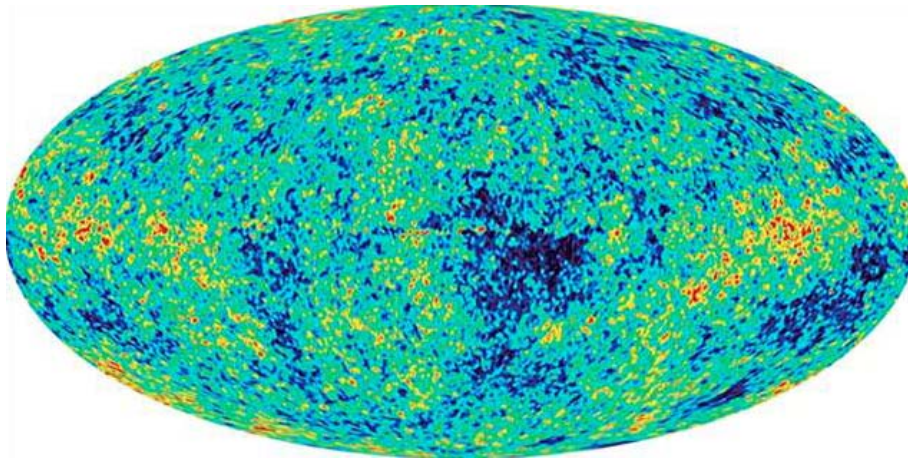
La Terre et son étoile

Ce qui suit constitue l'esquisse d'un petit drame cosmique en trois actes qui, comme ne l'indique pas ce titre, pourrait s'intituler « L'Énergie, une obsession du vivant ». La Terre et son étoile en constitueront le décor. Au commencement du temps, la scène baigne dans une énergie primordiale. Les physiciens parlent plutôt d'un événement violent, libérant une quantité considérable de matière et de rayonnement, et générant un ensemble de forces qui permettront à notre Univers de se structurer peu à peu. Dans le premier acte, c'est le cheminement de cette énergie que je vous inviterai à suivre, jusque dans notre minuscule faubourg de l'Univers, constitué par la Terre et le Soleil. Dans le deuxième acte, la scène se remplit de quelques hommes craintifs devant cette étoile mouvante qui les éclaire et les nourrit : son mouvement les intrigue, cette dépendance les inquiète. Ils construisent des mythes, sortes de représentations sacrées du réel. Dans le troisième acte, enfin, l'homme a proliféré ; il a pris de l'assurance, achève de coloniser la planète dans un délire énergivore et la quête du fluide régénérant recommence, toujours obsessionnelle.

1. L'énergie primordiale et la chaudière solaire

Zoom dans le cosmos

Au terme du premier jour, Dieu dit : « Que la lumière soit et la lumière fut » ; et là, il faut souligner que le texte de la Genèse est en accord, à quelques détails chronologiques près, avec les dernières observations satellitaires.



Cette image étonnante des plus vieux photons du monde, émis peu après le grand flash initial il y a environ quatorze milliards d'années-lumière, illustre la capacité de tout système optique, pointé vers l'Univers, à remonter le temps : c'est ainsi qu'à l'instant présent, les petits êtres verdâtres qui nous observent, peut être, depuis Orion, situé seulement à deux mille années-lumière de nous, voient défiler les légions romaines sur le pourtour méditerranéen ! Cette soupe primitive n'est pas uniforme : elle contient des grumeaux, des amas de matière un peu plus denses et chauds, qui sont les germes des futures galaxies. Parmi elles, la Voie lactée, disque d'environ cent mille années-lumière de diamètre contenant des centaines de milliards d'étoiles, et notamment le système solaire, de taille enfin raisonnable : à peine vingt heures-lumière !

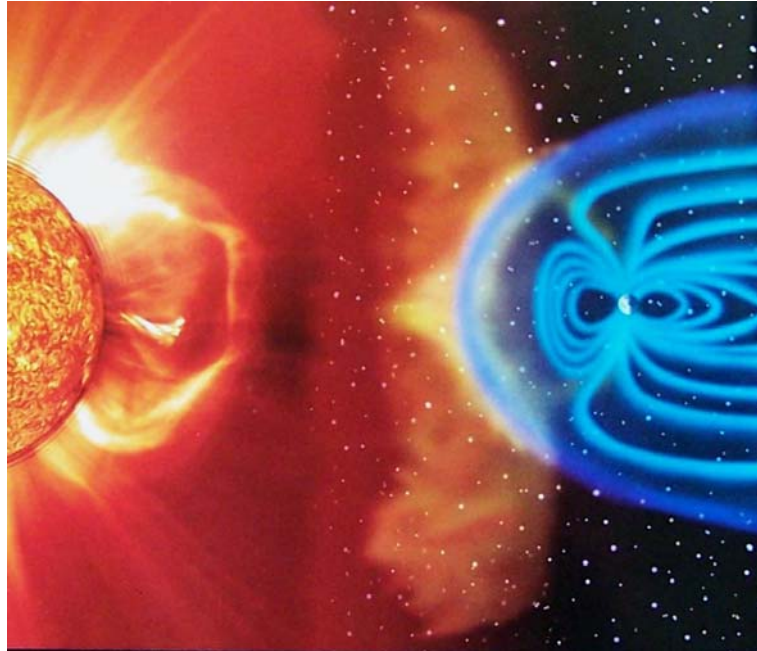
Le couple Terre-Soleil

La Terre est la troisième petite planète la plus proche du Soleil. Après l'éclair initial, la matière s'organise : les particules élémentaires s'agglomèrent pour former des protons qui conduiront aux atomes d'hydrogène, au deutérium puis à l'hélium. Cette synthèse se poursuit ensuite dans de véritables laboratoires cosmiques constitués par le cœur même des étoiles. Il y règne une température et une pression suffisante pour la fabrication de noyaux de plus en plus lourds comme le carbone, l'oxygène et l'azote ; mais les plus grosses de ces étoiles mènent un train de vie infernal, finissent par exploser et, dans un immense feu d'artifice, ensemencent toute leur galaxie avec ces atomes précieux.

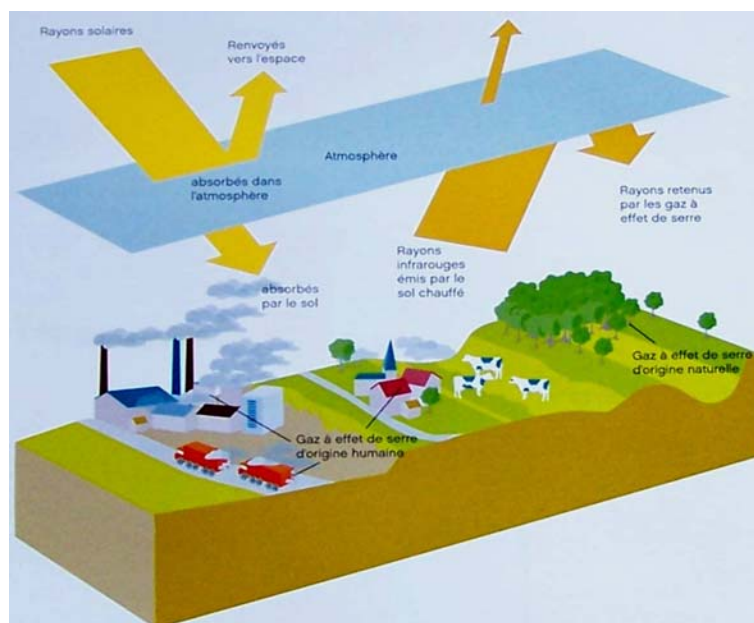
Notre Soleil est le fruit de cette synthèse primitive conduisant aux éléments légers. Il est issu d'une nébuleuse ancienne, riche en hydrogène, véritable pépinière d'étoiles. Son cœur, à environ 16 millions de degrés, diffuse son énergie jusqu'à la périphérie portée à 6 000 degrés. Au-delà, s'établit une couronne plus chaude, véritable atmosphère solaire, qui inonde l'espace en rayonnement et en particules, constituant le vent solaire. À ce vent permanent se superposent, sur des durées de quelques minutes, de vrais ouragans, les

éjections de masse coronales : il s'agit de dizaines de millions de tonnes de matière expulsée à des vitesses considérables, qui peuvent atteindre les planètes les plus proches en quelques heures.

Sphère massive d'environ 6 400 km de rayon – dont on aperçoit à la périphérie trois pellicules respectivement liquide, solide, et gazeuse – la Terre, contrairement au Soleil, est riche en éléments lourds issus des explosions stellaires passées. En son centre, un noyau en fusion, à environ 6 000 °C, dont l'énergie se propage jusqu'à l'écorce externe. La présence de fer et de nickel fournissent à la Terre un champ magnétique utile pour son avenir :



Le couple traverse une crise aigüe : le Soleil a un comportement violent qui se traduit par une brutale émission de matière coronale. Les coups pleuvent mais la Terre, pour se protéger de ce bombardement, dispose du bouclier naturel constitué par son champ magnétique ; à son approche, les particules sont déviées, de telle sorte que cet ouragan solaire nous épargne. La Terre est encore protégée par un deuxième bouclier, thermique celui-là, formé par la pellicule d'atmosphère, de quelques centaines de kilomètres d'épaisseur, siège de tous les transferts d'énergie qui sont responsables des grands équilibres de notre planète.



Dans la partie basse de cette atmosphère, le Soleil est la source principale d'énergie, dont le tiers est réfléchi vers l'espace : c'est l'effet parasol qui contribue au refroidissement terrestre. Il est contrebalancé par un effet de serre, dû aux gaz réfléchissant le rayonnement infrarouge émis par la Terre. C'est l'équilibre entre ces deux contributions qui conduit à une température moyenne de 15 °C et qui rend notre planète à peu près habitable. En fait, ce bilan est très simplifié, la machine thermique est beaucoup plus complexe : il faudrait ajouter, à l'échelle du globe, les vents dominants générés par l'excès de chaleur au niveau de l'équateur, qui représentent une énergie considérable, ainsi que les courants océaniques profonds.

À la question posée au départ, « Qu'est devenue la formidable énergie primordiale ? », la réponse, au niveau de notre minuscule faubourg, est bien ce schéma avec des flèches en tout sens : il suggère le déplacement d'un fluide que nous avons déjà nommé « énergie » et dont nous allons maintenant essayer de préciser la signification.

L'énergie

Richard Feynman, physicien américain de grand talent, commençait son cours au Californian Institute of Technology par ces mots : « Il est important de réaliser qu'en physique, aujourd'hui [...] nous ne savons pas ce qu'est l'énergie ». Voilà qui commence mal ! Et pourtant le schéma précédent, aussi bien que le sens commun, suggèrent que quelque chose se déplace ; ceci pourrait nous conduire à cette première formulation : l'énergie est la capacité d'un système à produire du mouvement grâce à l'action des forces fondamentales de l'Univers.

Ces forces ont structuré la matière en rassemblant ses constituants, lui fournissant ce que nous appellerons une « énergie de liaison » : la molécule d'eau d'un barrage perd une partie de cette énergie qui la lie à la Terre par la force de gravitation et gagne, en contrepartie, une énergie de mouvement qui entraînera la roue d'un moulin ou d'une turbine. Ainsi l'énergie est-elle un fluide qui s'échange, un peu comme la monnaie dans une transaction. Comme pour un budget, le bilan doit être équilibré : l'énergie a donc la même valeur avant et après sa transformation ; on dit qu'elle se conserve :

— c'est la force électrique qui agit quand un atome de carbone fusionne avec deux atomes d'oxygène pour donner le fameux gaz carbonique CO₂. L'énergie de liaison de cette dernière molécule est inférieure à celle de ses constituants. Le principe de conservation impose donc l'apparition d'énergie de mouvement : c'est l'énergie d'agitation thermique des flammes de CO₂ qui dansent autour des buches d'un feu de bois. Ce feu chimique bouleversa l'humanité il y a 500 000 ans, puis à nouveau au XIX^e siècle, avec l'apparition des carburants fossiles.

— la force nucléaire est responsable de l'énergie de liaison des nucléons : un noyau de deutérium fusionne avec un noyau de tritium pour générer un noyau d'hélium. Le neutron en surplus est émis avec une vitesse considérable car l'énergie de liaison des noyaux est beaucoup plus élevée que celle des atomes. La chaudière solaire fonctionne sur ce principe, qui est aussi celui des différentes nucléosynthèses dans l'Univers.

On notera que, dans ces deux exemples, du mouvement a bien été créé à partir de ce réservoir, de ce véritable potentiel d'énergie, qu'est la matière.

Un dernier mécanisme d'échange doit être introduit : il met en jeu l'énergie biochimique responsable de la vie. Celle-ci pourrait être apparue dans un océan primitif contenant sucres et alcools qui ont fourni les premiers apports nutritifs. Mais la multiplication des consommateurs a probablement provoqué une pénurie, la première grande crise mondiale de l'énergie, jusqu'à l'apparition d'une molécule spécialisée capable d'emmagasiner l'énergie solaire : la chlorophylle. Soit un végétal avec ses capteurs solaires à base de chlorophylle : le système réalise, à partir d'eau et de CO₂, la synthèse de glucide, ici sous la forme de grains d'amidon. Ces glucides constituent des sources d'énergie utilisables pour les réactions chimiques, caractéristiques du métabolisme d'un organisme vivant. Ce processus, prolongé jusqu'à l'homme par la chaîne alimentaire, sert comme précédemment à produire du mouvement : mouvement intercellulaire ou déplacement effectué par nos muscles. Bel exemple de métamorphose de l'énergie que celui de la chaîne alimentaire : fusion de l'hydrogène d'abord produisant le rayonnement solaire, puis photosynthèse, stockage de glucide par le végétal, fabrication de protéine par l'animal, métabolisme humain et finalement chaleur du corps et mouvement. Comme ordre de grandeur commode, rappelons que 100 W/h représente l'énergie thermique dissipée par ce même corps humain en une heure.

Par l'énergie biochimique qu'il consomme, l'homme apparaît ainsi comme un sous-produit du Soleil. De cette dépendance naissent les premières interrogations, les premières angoisses, les premiers mythes.

2. Interrogations primitives et mythes solaires

L'homme et les mythes

Le décor est planté et, dans ce deuxième acte, l'homme entre en scène, après une interminable gestation : il y a quelques centaines de milliers d'années, la découverte du feu permet un développement spectaculaire de son cerveau, l'acquisition d'une conscience et d'une capacité de perception. Face à un environnement mystérieux, qui l'inquiète, il va créer des mythes. Ces mythes ont un contenu culturel essentiel car, même s'ils font intervenir une part de sacré, ils se réfèrent toujours à une réalité du monde, ils en cherchent une explication ; par ce processus cognitif, l'homme archaïque commence à construire sa représentation du réel. Par ailleurs, certains de ces mythes ne sont pas dépourvus de merveilleux : en Asie, on pensait que les étoiles n'étaient que des trous dans le rideau nous séparant des dieux. Il fallait donc les observer avec soin, ce qui fait probablement de l'astronomie l'un des plus vieux métiers du monde. Et, parmi ces astres, le Soleil jouit d'un statut particulier. Par la puissance de son éclat et de l'énergie qu'il transmet, par le fait qu'il renaît tous les matins, donc par cette apparence d'immortalité, il prouve que son essence ne peut être que divine. Mais entre sa disparition le soir et sa résurrection du lendemain, l'homme s'interroge et s'inquiète sur son destin nocturne : les Égyptiens décrivent avec une précision presque scientifique les douze heures que Ré passe dans la barque nocturne traversant le monde souterrain. Le matin, il est transféré sur la barque d'or du jour et reprend sa course. Il a puisé dans ses épreuves nocturnes l'énergie nécessaire pour sa résurrection.

Les mythes protecteurs. Le feu et le Soleil

La construction de ce dernier récit mythique traduit l'angoisse liée à la pénurie de lumière et d'énergie. Et souvent, dans ce cas, les hommes allument de gigantesques feux pour restituer la lumière. Feu terrestre et feu solaire sont d'ailleurs étroitement liés : dans la tradition aztèque, le dernier des cinq soleils est engendré par le sacrifice d'un dieu, qui doit se jeter dans un brasier pour allumer l'astre, le sang des hommes étant ensuite nécessaire pour le mettre en mouvement. Ainsi l'homme a-t-il besoin de l'énergie solaire, mais il pense aussi que le Soleil a besoin de l'énergie des hommes : ce lien puissant apparaît dans quelques sanctuaires néolithiques où, le jour du solstice d'hiver si chargé d'angoisse, les rayons solaires illuminent une pierre qui était recouverte des ossements ancestraux. L'énergie attribuée à ces ossements immuables, donc sacrés, était probablement destinée à régénérer le soleil défaillant. Le lien entre la Terre et le Soleil est encore illustré à travers un vieux mythe bolivien, celui de Pachamama, la Terre-Mère associée à une montagne sacrée. Dans la récupération qui en fut faite par les Jésuites, c'est Marie qui personnifie la Terre et la sainte Trinité, le Soleil.

Les prémices de la démythification

Puis, lentement, la relation entre le Soleil et l'homme évolue : celui-ci remarque ce qui, dans son mouvement, ne varie pas et il en fait un terme de référence plutôt qu'un objet de culte. Le passage de la phase mythique à la phase de l'observation raisonnée s'amorce. Au XIX^e siècle une dernière interrogation subsiste, celle de la source de l'énergie solaire : l'hypothèse d'un combustible fossile ne résiste pas au calcul et c'est en 1939 que le physicien Bethe découvre que la chaudière solaire fonctionne à l'hydrogène grâce aux réactions de fusion nucléaire déjà introduites : la démythification s'achève et avec elle débute notre dernier acte.

3. Les angoisses modernes et le soleil apprivoisé

Anthropocène

À partir du XIX^e siècle, l'homme semble maîtriser le monde : il continue à se reproduire à une allure vertigineuse, à coloniser la planète et même l'espace. Par son impact croissant sur la biosphère, il devient une nouvelle force géophysique. Nous entrons dans une nouvelle ère, l'Anthropocène, dont le début correspond au décolllement de la consommation énergétique totale par an et par habitant sur la Terre. On constate que, compte tenu de l'augmentation de la population, la consommation annuelle, depuis le paléolithique jusqu'à nos jours, a été multipliée par environ 10 000, en raison du pillage systématique de l'énergie fossile léguée par le Soleil. Ce constat débouche sur deux interrogations relativement inquiétantes :

— la première, qui découle directement du pillage, concerne la pénurie de combustible qui s'annonce d'ici une cinquantaine d'années pour l'énergie fossile et qui va nous imposer d'inventer de nouvelles sources ; elle concerne aussi les dégâts collatéraux dus à cette

boulimie de consommation et affectant les grands systèmes régulateurs de la planète, dont le cycle de l'eau ;

— la deuxième interrogation est liée aux prophéties apocalyptiques de ceux qui, armés d'ordinateurs géants, prédisent l'évolution de la température moyenne à la surface de la planète pour les cinquante prochaines années ; des causes naturelles ont conduit dans le passé à des réchauffements du même ordre que ceux qui seraient attribués à l'homme en 2050 et ma conviction est qu'il faut comprendre ces mécanismes naturels — ce qui est loin d'être le cas actuellement — avant de privilégier l'origine anthropique, même si certaines corrélations avec nos émissions de CO₂ sont troublantes.

L'avenir du Soleil

Il est nécessaire, maintenant, d'effectuer un bilan de la relation que nous entretenons avec notre Soleil. Celui-ci est la clé de nos grands systèmes régulateurs : premier dessaleur d'eau de mer, il assure le cycle de l'eau. Il entretient la vie en nous assurant une température de 15 °C et en produisant l'énergie biochimique de la chaîne alimentaire ; pour ce qui est de nos besoins énergétiques de base, la dépendance est donc totale. Mais les exigences de l'homme moderne sont extravagantes comme nous l'avons déjà vu. Par exemple, pour produire 1 milliard de Watts électriques pendant un an :

	solution	contraintes	réserves
1	2 millions de tonnes de combustible fossile	6 millions de tonnes de CO ₂ ; déchets solides	environ 100 ans
2	25 tonnes d'uranium	0 tonne de CO ₂ ; déchets radioactifs	200 ans (hors surgénérateur)
3	« combustible solaire »	0 tonne de CO ₂ ; 0 tonne de déchets ; environ 25 km ² de capteurs	durée de vie du soleil

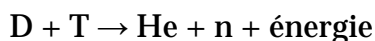
— les solutions « classiques » posent des problèmes de réserves et de déchets, sans oublier les avatars géopolitiques d'approvisionnement ;

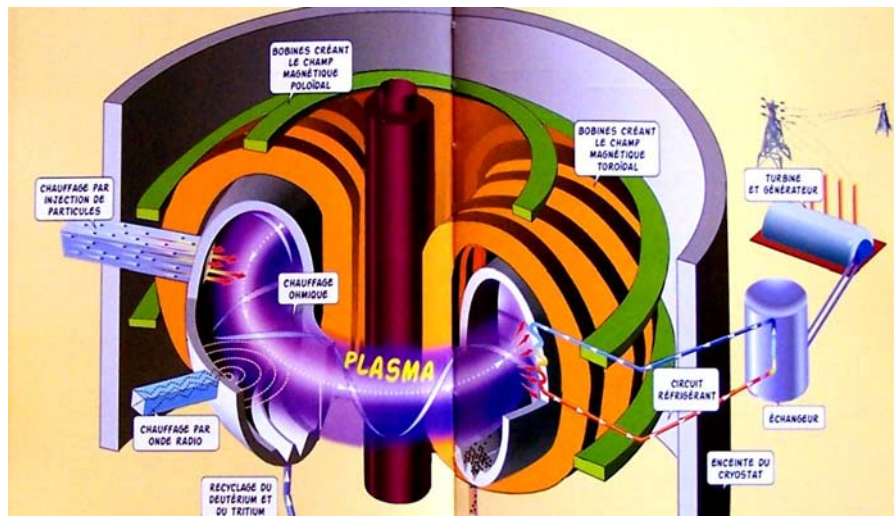
— la solution solaire existe mais elle est difficile à mettre en œuvre en raison de l'importance des surfaces nécessaires à son implantation ; compte tenu de nos exigences, les limites du solaire et plus généralement des énergies renouvelables sont évidentes ; comme le soulignera Guy Herrouin, on peut espérer que, dans les prochaines décennies, elles fourniront 20 % de nos besoins, tout au plus. ;

— à l'horizon 2050, quand pétrole et gaz seront devenus des produits de luxe, une source d'énergie pérenne, fiable, géopolitiquement sûre et peu polluante sera nécessaire ; une solution utilisant des isotopes de l'hydrogène existe sous forme de prototype, à une centaine de kilomètres seulement d'ici.

Le soleil domestiqué ou le feu thermonucléaire

Je vous invite donc à un dernier voyage, enfin raisonnable celui-là, puis qu'il va nous conduire près du confluent entre la Durance et le Verdon, dans un joli bois de chênes et de maquis peuplé de sangliers. Vous y verrez surgir, dans les prochaines années, un grand hall aussi haut que l'Arc de triomphe. À l'intérieur, pas de cette flamme vacillante du souvenir mais un feu d'une toute autre nature, tourné vers l'avenir. L'idée un peu folle est de recréer sur Terre les conditions de fonctionnement de notre Soleil, c'est-à-dire de conquérir, 500 000 ans après le feu du carbone, celui de l'hydrogène, en mettant en œuvre cette réaction de fusion nucléaire dont nous avons déjà parlé.





Les deux isotopes de l'hydrogène sont injectés dans une chambre torique, une sorte d'immense tunnel replié sur lui-même, où ils sont chauffés à une température de plusieurs millions de degrés, au moyen de ces microondes qui vous sont maintenant familières. À ces températures, le gaz devient conducteur et peut être emprisonné dans l'espace grâce à l'action du champ magnétique créé par vingt bobines géantes, parcourues par des courants intenses circulant dans un alliage supraconducteur, refroidi à $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ par de l'hélium liquide ; caractéristique étonnante pour cette machine que de faire cohabiter, à quelques mètres de distance, du deutérium à plusieurs millions de degrés et de l'hélium proche du zéro absolu ; deuxième contrainte pour cette prison magnétique, c'est de devoir résister à des pressions du même ordre que celles qui s'exercent sur un sous-marin nucléaire en immersion profonde. Le reste de l'installation correspond à un réacteur électrogène classique où le fluide caloporteur est chauffé par l'impact des neutrons rapides.

	solution	contraintes	réserves
1	2 millions de tonnes de combustible fossile	6 millions de tonnes de CO ₂ ; déchets solides	environ 100 ans
2	350 kg de deutérium et de tritium	0 tonne de CO ₂ ; déchets à faible durée de vie	plus de 1 000 ans

Le résultat est spectaculaire, bien que pas encore définitivement acquis : 350 kg du mélange D-T permettraient de produire, sans émission de CO₂, la même quantité d'électricité que les 2 millions de tonnes de combustible fossile émettant 6 millions de tonnes de CO₂. Finalement, une technologie très prometteuse qui assurerait une indépendance énergétique pour plusieurs milliers d'années à la planète.

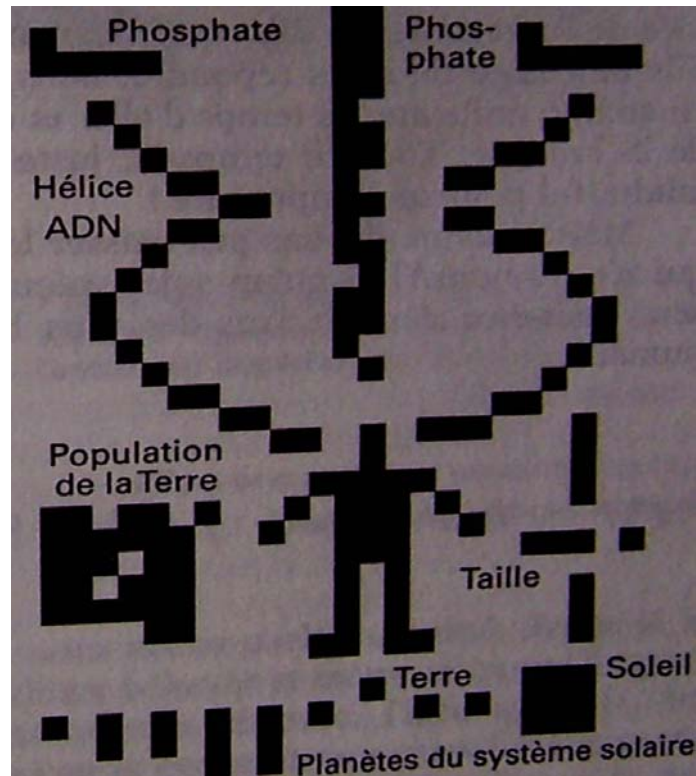
Quelques interrogations, cependant : jadis, les bras des hommes et des femmes étaient le principal moyen de transformer la chaleur du Soleil, le principal moteur alimenté par le combustible végétal de la Terre. Le feu du carbone a ensuite décuplé cette puissance et perturbé gravement notre planète : n'y a-t-il pas un risque potentiel avec ce nouveau feu nucléaire ? Et, si ce soleil artificiel ne voyait pas le jour, pour combien de temps pouvons nous encore compter sur notre Soleil naturel ?

Conclusion : L'embrassement programmé du couple

Ceci nous conduit au dénouement de notre drame. Dans le passé, jouer avec le feu a entraîné de sérieux ennuis pour Prométhée et, de la même manière, dans certaines mythologies indo-européennes, l'abus de puissance par les hommes entraîne un embrasement généralisé du monde. La physique moderne a une vision assez précise de ce drame ultime : quand le Soleil actuel aura épuisé son carburant, soumis aux lois de la physique (*dura lex sed lex*), sa luminosité et son volume vont lentement augmenter et sa couleur va virer au rouge ; à ce stade de géante rouge, il aura atteint mille fois son éclat actuel et volatiliser successivement l'atmosphère, la biosphère, les océans puis l'ensemble de la planète, pour s'évanouir lui-même dans l'espace. Étrange destin pour ce couple cosmique voué à l'anéantissement ; étrange dessein – si dessein il y a – dans ces lois de la Nature qui contiennent en même temps un projet de vie et celui de sa destruction.

Le sentiment de cette finitude a quelque chose de profondément absurde, notre drame cosmique en trois actes se termine comme du Becket... Et pourtant, on peut imaginer une lueur de cohérence dans tout cela : les atomes issus de cette volatilisation dans l'espace, nos atomes peut-être, fusionneront un jour avec d'autres vestiges stellaires. De ces rencontres pourront à nouveau jaillir lumière et chaleur. Et dans très longtemps, quand le fragile souvenir de la Terre et de son étoile aura disparu, alors, peut-être, une étrange planète sentira-t-elle sourdre de ses entrailles quelques frémissements de vie : le cycle sera refermé et l'absurdité un peu moins inacceptable.

D'une certaine manière, nous aurons légué à ces lointains héritiers quelques atomes de matière inerte. Modeste héritage pourrait on penser... mais peut-être pas car, il y a quelques années, depuis un radiotélescope géant, nous avons pris la précaution d'envoyer à travers l'espace, un message codé, porté par une onde électromagnétique, informant l'Univers que nous étions issus de deux hélices d'ADN, que nous avions à peu près telle allure (en bas au centre) et habitons la troisième planète la plus proche d'une grosse étoile massive (en bas à droite).



D'ici quelques années, nous annoncerons aussi avoir construit sur terre un petit soleil de forme torique.

Et ainsi, bien après nous, continuera à flotter dans l'espace un dernier vestige de notre énergie créatrice, sous la forme de ce message, poursuivant son chemin à la vitesse de la lumière dans l'immensité.